Вклад операторов размерности 7 в взаимодействие топ-кварка с нейтральным током с нарушением аромата

Денисов В.В.[1], Слабоспицкий С.Р.[2]

[1]Московский физико-технический институт (ГУ)
[2]НИЦ „Курчатовский институт" – ИФВЭ

21 ноября 2018

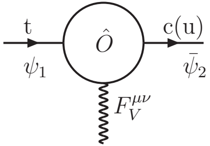
Преимущества физики t-кварка

- Время жизни t-кварка много меньше времени адронизации
- Основная мода распада($t \to Wb$)
- Хорошая точность вычислений в рамках СМ процессов с t-кварками
- FCNC(например: $t \to Vu(c)$) в СМ сильно подавлены из-за GIM-механизма ($\sim 10^{-11} - 10^{-13}$)
- Вклад новых взаимодействий за рамками СМ может резко увеличить вероятности таких редких процессов

Феноменологический лагранжиан FCNC взаимодействия

Требования к построению лагранжиана

Лагранжиан взаимодействия будет рассматриваться в виде:



$$\mathscr{L}_{FCNC} \propto \bar{\psi}_u \hat{O}^{\mu\nu} \psi_t F_V^{\mu\nu}$$

- Рассматриваем взаимодействие только с одним безмассовым калибровочным бозоном
- Лагранжиан должен обладать калибровочной и Лоренц-инвартностью
- Оператор $\hat{O}^{\mu\nu}$ состоит из матриц Дирака, Гелл-Мана и ковариантных производных
- Каждое слагаемое лагранжиана содержит размерный параметр Λ и независимые аномальные константы

Феноменологический лагранжиан FCNC взаимодействия

Операторы размерности 5 и 6 известны и хорошо изучены.

Лагранжиан размерности 5

$$\mathscr{L}^{(5)}_{FCNC} \quad = \quad e_q \frac{\kappa_A}{\Lambda_A} \bar{\psi}_2 \sigma^{\mu\nu} \psi_1 F^{\mu\nu} \quad + \quad g_s \frac{\kappa_G}{\Lambda_G} \bar{\psi}_2 t^a \sigma^{\mu\nu} \psi_1 G^{\mu\nu}_a$$

$$F^{\mu\nu} = \partial_\mu A^\nu - \partial_\nu A^\mu, \;\; G^{\mu\nu}_a = \partial_\mu G^\nu_a - \partial_\nu G^\mu_a + g_s f^{abc} G^\mu_b G^\nu_c$$

FCNC: взаимодействие с фотоном

$$\mathscr{L}^{\rm QED}_{(7)} = \frac{e_q}{\Lambda^3}\bar{\psi}_u \hat{O}^{\mu\nu}\psi_t F^{\mu\nu} + \frac{e_q}{\Lambda^3}\bar{\psi}_u \hat{O}^{\mu\nu}_{(D)}\psi_t \tilde{F}^{\mu\nu}$$

оператор $\hat{O}^{\mu\nu}$ содержит 4 калибровочно-инвариантных слагаемых: $D^\mu D^\nu, D^{*\,\mu} D^{*\,\nu}, D^{*\,\mu} D^\nu, D^\nu D^{*\,\mu}$

$$D^\mu D^\nu = D^{*\,\mu} D^{*\,\nu} = -\frac{1}{2}\Delta^{\mu\nu};\ D^\nu D^{*\,\mu} = D^{*\,\mu} D^\nu \ - \Delta^{\mu\nu}$$

$$\hat{O}^{\mu\nu} = \kappa_1 D^{*\,\mu} D^\nu - \kappa_2 \frac{\Delta^{\mu\nu}}{2};\ \hat{O}^{\mu\nu}_{(D)} = \kappa_3 D^{*\,\mu} D^\nu - \kappa_4 \frac{\Delta^{\mu\nu}}{2}$$

$$D_\mu \psi = (\partial_\mu - ie_q A_\mu - ig_s t^a G_{a\,\mu})\psi$$
$$\bar{\psi} D^*_\mu = \bar{\psi}(\partial_\mu + ie_q A_\mu + ig_s t^a G_{a\,\mu})$$
$$\tilde{F}^{\mu\nu} = \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} F^{\alpha\beta},\ \kappa_i = \xi^\gamma_i + \zeta^\gamma_i \gamma^5$$
$$\Delta^{\mu\nu} = ie_q\, F^{\mu\nu} + ig_s t^a G^{\mu\nu}_a$$

FCNC: взаимодействие с глюоном

$$\mathscr{L}_{(7)}^{\mathrm{QCD}} = \frac{g_s}{\Lambda^3} \bar{\psi}_u \hat{O}^{a\,\mu\nu} \psi_t G_a^{\mu\nu} + \frac{g_s}{\Lambda^3} \bar{\psi}_u \hat{O}_{(D)}^{a\,\mu\nu} \psi_t \tilde{G}_a^{\;\mu\nu}$$

оператор $\hat{O}^{a\,\mu\nu}$ содержит 3 калибровочно-инвариантных слагаемых: $D^{*\,\mu} t^a D^\nu, t^a D^\mu D^\nu, D^{*\,\mu} D^{*\,\nu} t^a$

$$\hat{O}^{a\,\mu\nu} = \lambda_1 D^{*\,\mu}\, t^a\, D^\nu - \lambda_2\, t^a \frac{\Delta^{\mu\nu}}{2}$$

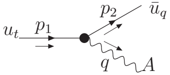
$$\hat{O}_{(D)}^{a\,\mu\nu} = \lambda_3 D^{*\,\mu}\, t^a\, D^\nu - \lambda_4\, t^a \frac{\Delta^{\mu\nu}}{2}$$

$$\tilde{G}_a^{\;\mu\nu} = \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} G_a^{\alpha\beta}$$

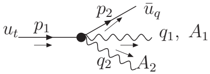
$$\lambda_i = \xi_i^g + \zeta_i^g \gamma^5$$

Правила Фейнмана

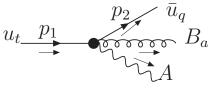
Взаимодействие с фотоном



$$e_q \kappa_1 \, p_1^\mu p_2^\nu \left[q^\mu g^{\nu\alpha} - q^\nu g^{\mu\alpha} \right] A^\alpha$$



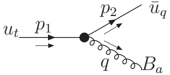
$$e_q^2 \kappa_1 \left[(q_1 + q_2)^2 g^{\alpha\beta} - q_2^\alpha (q_1 + q_2)^\beta - \right.$$
$$\left. - (q_1 + q_2)^\alpha q_1^\beta \right] A_1^\alpha A_2^\beta$$
$$2 e_q^2 \kappa_2 \left[(q_1 q_2) g^{\alpha\beta} - q_1^\beta q_2^\alpha \right] A_1^\alpha A_2^\beta$$
$$2 e_q^2 \kappa_3 \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_1^\mu q_2^\nu A_1^\alpha A_2^\beta$$



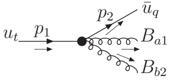
$$e_q g_s \, \kappa_1 \, t^a \left[((q_1 + q_2) q_1) \, g^{\alpha\beta} - (q_1 + q_2)^\alpha q_1^\beta \right] A_1^\alpha B$$
$$e_q g_s \, \kappa_2 \, t^a \left[(q_1 q_2) g^{\alpha\beta} - q_1^\beta q_2^\alpha \right] A_1^\alpha B_{2\,a}^\beta$$
$$e_q g_s \, \kappa_3 \, t^a \, \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_1^\mu q_2^\nu A_1^\alpha B_{2\,a}^\beta$$

Правила Фейнмана

Взаимодействие с глюоном



$$g_s \lambda_1 \; p_1^\mu p_2^\nu \left[q^\mu g^{\nu\alpha} - q^\nu g^{\mu\alpha} \right] B_a^\alpha$$



$$g_s^2 W_{gg}^{ab} \; B_{a1}^\alpha B_{b2}^\beta$$

$$\lambda_1 t^a t^a \Big[((p_1 q_2) - (p_2 q_1)) g^{\alpha\beta} -$$

$$- p_2^\alpha p_1^\beta + p_1^\alpha p_2^\beta - q_2^\alpha p_1^\beta + p_2^\alpha q_1^\beta \Big]$$

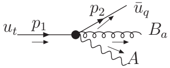
$$\lambda_1 t^b t^a \Big[((p_1 q_1) - (p_2 q_2)) g^{\alpha\beta} +$$

$$+ p_2^\alpha p_1^\beta - p_1^\alpha p_2^\beta + q_2^\alpha p_2^\beta - p_1^\alpha q_1^\beta \Big]$$

$$\lambda_2 \;\; \left(\delta^{ab}/3 + t^k d^{kab} \right) \;\; \left[(q_1 q_2) g^{\alpha\beta} - q_2^\alpha q_1^\beta \right]$$

$$\lambda_3 \;\; \left[\left(\delta^{ab}/3 + t^k d^{kab} \right) q_1^\mu q_2^\nu + 2 i t^k f^{kab} p_2^\mu p_1^\nu \right] \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta}$$

$$\lambda_4 \;\; \left(\delta^{ab}/3 + t^k d^{kab} \right) \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_1^\mu q_2^\nu$$



$$e_q g_s \, \lambda_1 t^a \; \left[(((q_1 + q_2) q_2) g^{\alpha\beta} q_2^\alpha - q_2^\alpha (q_1 + q_2)^\beta \right] A_1^\alpha B_2^\beta$$

$$e_q g_s \lambda_2 t^a \; \left((q_2 q_1) g^{\alpha\beta} - q_2^\alpha q_1^\beta \right) A_1^\alpha B_{2\,b}^\beta$$

$$e_q g_s (\lambda_3 + \lambda_4) t^a \; \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_1^\mu q_2^\nu A_1^\alpha B_{2\,a}^\beta$$

Ширины распадов топ-кварка

$$\Gamma(t \to u\gamma\gamma) = e_t^4 \alpha_e^2 \, \mu_\Lambda^6 \, (m/480\pi) \mathcal{K}_{\gamma\gamma}$$

$$\Gamma(t \to u\gamma g) = e_t^2 \alpha_e \alpha_s \, \mu_\Lambda^6 \, (m/720\pi) \mathcal{K}_{\gamma g}$$

$$\Gamma(t \to u\, g\, g) = \alpha_s^2 \, \mu_\Lambda^6 \, (m/2160\pi) \, [7\chi_1 + 18\chi_2]$$

$$\Gamma(t \to u\, \bar{q}\, q) = \alpha_s^2 \mu_\Lambda^6 (m/360\pi) \, (|\xi_1^g|^2 + |\zeta_1^g|^2)$$

$$\Gamma(t \to u\bar{u}u) = \alpha_s^2 \mu_\Lambda^6 (23m/8640\pi) \, (|\xi_1^g|^2 + |\zeta_1^g|^2)$$

$$\mu_\Lambda = \frac{m}{\Lambda}$$

Пара кварков с небольшой инвариантной массой могут образовать адронную струю (j). Оценим вероятность нахождения такого процесса, положив инвариантную массу пары конечных частиц меньше 40 ГэВ

$$m_{min} \leq 40 \text{ ГэВ} \to \delta = \left(\frac{m_{min}}{m}\right)^2 \simeq 0.05$$

$$\beta[t \to jj] = \Gamma(t \to jj)/\Gamma(t \to uab)$$

$$\begin{array}{lll}
t \to u\gamma\gamma: & \beta[t \to j(u\gamma) + \gamma] = (5/2)\delta & \simeq 0.13 \\
t \to u\gamma g: & \beta[t \to j(u\gamma) + j] = (5/4)\delta + (5/2)\delta^3(4 - 3\delta) & \simeq 0.07 \\
t \to ugg: & \beta[t \to j + j] = (5/4)\delta + (5/4)(1 - (1 - \delta)^2) & \simeq 0.3 \\
t \to u\bar{q}q: & \beta[t \to j + j] = 5\delta(1 - \delta) & \simeq 0.24 \\
t \to u\bar{u}u: & \beta[t \to j + j] = (20/23)\delta(6 - 7\delta + 2\delta^2) & \simeq 0.25
\end{array}$$

Результаты

1. Сформулированы принципы построения операторов аномального FCNC взаимодействия
2. Построен оператор аномального FCNC взаимодействия t-кварка с фотоном и глюоном размерности 7
3. Получены правила Фейнмана для таких взаимодействий
4. Посчитаны ширины процессов с таким взаимодействием
5. Показано, что в заметном числе случаев (примерно 25%), распады топ-кварка за счет рассмотренного выше взаимодействия приводят к двухчастичным конечным состояниям, более точные оценки можно получить только после дальнейшего моделирования

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!